



بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر المان‌های گوه‌ای شکل بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی در جریان رویه ای

کیومرث روشنگر^{۱*}، سمیرا اخگر^۲

^۱ گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ایران

^۲ گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳

کلمات کلیدی:

سرریز پلکانی

المان‌های گوه‌ای

تغییرات سرعت و فشار

استهلاک انرژی

Flow-3D

خلاصه: سرریز پلکانی یک طرح هیدرولیکی مقرون بصرفه جهت مستهلک نمودن انرژی جریان آب عبوری از روی سرریز است. بدلیل وجود برخی محدودیت‌ها در سرریزهای پلکانی، در این تحقیق برای افزایش و بهبود اثربخشی استهلاک انرژی طرحی در نظر گرفته شده است. بدین منظور تأثیر وجود المان‌های گوه‌ای شکل بر تغییرات سرعت و فشار روی پله، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا با استفاده از مدل عددی Flow-3D چندین شکل از المان‌های گوه‌ای شکل با تغییر در چیدمان گوه‌ها و تغییر در میزان دبی مورد بررسی قرار گرفته و مدل مناسب از جنبه بیشترین استهلاک انرژی در آزمایشگاه ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است. در آزمایشگاه ۲۵ آزمایش بر روی ۵ مدل فیزیکی، با تغییر در چیدمان گوه‌ها و دبی‌های متفاوت انجام گردید و با سرریز پلکانی ساده (بدون المان گوه‌ای) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزودن المان‌های گوه‌ای بر روی سرریز پلکانی موجب کاهش سرعت و کاهش ارتفاع آب در پایین دست سرریز به ترتیب تا حدود ۸۰٪ و ۳۰٪ و استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی تا حدود ۲/۷ برابر افزایش یافته است. با ترسیم پروفیل‌های توزیع فشار در لبه قائم پله و روی کف پله ملاحظه شد که فشار منفی روی کف پله به فشار مثبت تبدیل شده و فشار منفی در مقطع قائم تا حدود ۹۶٪ کاهش و فشار مثبت در مقطع قائم تا حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تراکم المان‌ها نتایجی که موجب افزایش استهلاک انرژی می‌شود چشمگیرتر است.

۱- مقدمه

دبی‌های متوسط دیده می‌شود. معیار پذیرش جریان رویه‌ای اولین بار توسط راجاراتنام [۱] ارائه گردید. وی شروع جریان رویه‌ای را به ازای $\frac{y_c}{h} \geq 0.8$ ارائه نمود که در آن y_c عمق بحرانی و h معرف ارتفاع پله است.

محققین زیادی نظیر چانسون [۲]، چمنی و راجاراتنام [۳] و کلز [۴] استهلاک انرژی روی مدل‌های آزمایشگاهی سرریز پلکانی ساده (بدون افزودن المان روی پله‌ها) مورد بررسی قرار داده‌اند. چانسون با آزمایشاتی که در این زمینه و برای جریان‌های تیغه‌ای انجام داد، نشان داد که استهلاک انرژی تابع عمق بحرانی، ارتفاع سد و ارتفاع پله هاست. چمنی و راجاراتنام جریان تیغه‌ای (جت) روی سرریزهای

هدف از طراحی و احداث سرریزهای پلکانی افزایش استهلاک انرژی و کاهش ابعاد سازه‌های پایین دست سرریز است. این نوع سرریزها به علت فراهم کردن بستر زبر مصنوعی، باعث افت انرژی جنبشی جریان شده و همچنین با ایجاد هوادهی در جریان عبوری، پدیده خلاءزایی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. جریان روی سرریز پلکانی به سه نوع رژیم تقسیم می‌شود. جریان تیغه‌ای، جریان رویه‌ای و جریان انتقالی. جریان تیغه‌ای در دبی‌های نسبتاً کم و جریان رویه‌ای در دبی‌های زیاد رخ می‌دهد و جریان انتقالی در

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kroshangar@yahoo.com



پله، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی در جریان رویه‌ای است. این المان‌ها به شکل گوه‌ای (مثلثی شکل در پلان) و با چیدمان‌های متفاوت می‌باشد.

۲- مطالعات عددی

در این تحقیق از روش عددی حجم محدود (نرم‌افزار Flow-3D برای بررسی تأثیر وجود المان‌های گوه‌ای شکل بر تغییرات سرعت و فشار درکف و لبه پله، ارتفاع آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی استفاده شده است. المان‌های گوه‌ای شکل در پلان به شکل مثلث دیده می‌شوند که در این تحقیق ۲ شکل از مثلث با ۴ چیدمان مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه و چیدمان این گوه‌ها در شکل ۱ آورده شده است. در این شکل منظور از 3-wedge 2 یعنی چیدمان ۳ با المان گوه‌ای نوع ۲ و مفهوم 4-wedge 1 یعنی چیدمان ۴ با المان گوه‌ای نوع ۱ است. مجموع ۹ مدل (۸ مدل سرریز پلکانی همراه با المان گوه‌ای شکل و یک مدل سرریز پلکانی ساده) با دبی‌های متفاوت در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است.

به منظور شبیه‌سازی میدان سرعت از معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفته استفاده شد. این معادلات شامل معادلات پیوستگی و مومنوم در دستگاه مختصات کارتزین به شرح زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

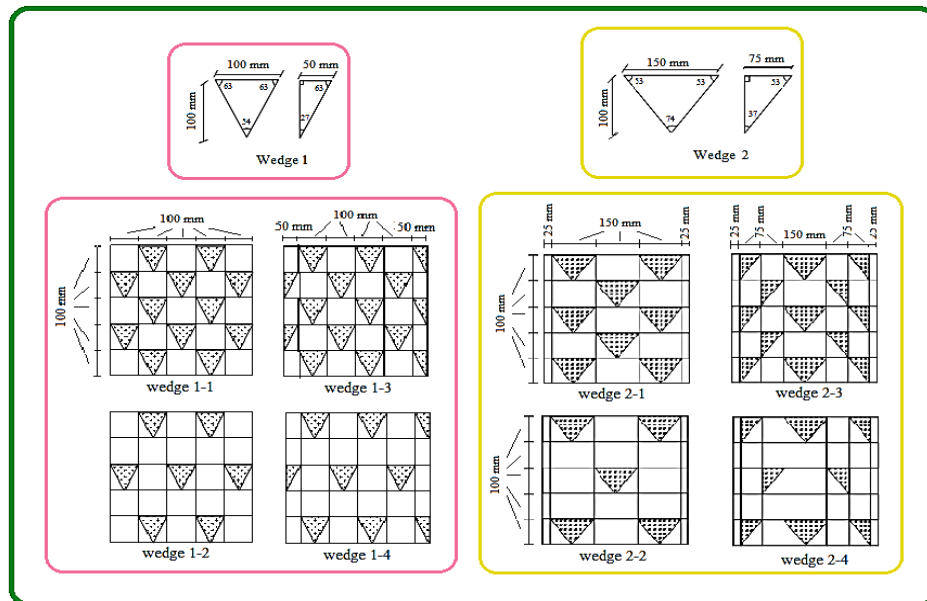
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

که در آن، V_F کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ چگالی سیال، R_{SOR} برابر چگالی چشمه است. u, v, w اجزای سرعت در جهت‌های x, y, z هستند. A_x, A_y, A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهت‌های x, y, z هستند. G_x, G_y, G_z شتاب‌های بدنه، f_x, f_y, f_z

پلکانی را مورد مطالعه قرار دادند [۲]. کلز [۴] استهلاک انرژی بین رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای را در شوت‌های پلکانی مقایسه کرد. علاوه بر مطالعه‌های آزمایشگاهی جهت بررسی استهلاک انرژی، تبورا و همکاران [۵] جریان روی سرریزهای پلکانی را با استفاده از روش‌های اجزا محدود ارزیابی کردند. اژدری مقدم [۶] هیدرولیک جریان را روی سرریز پلکانی با ۴ شکل مختلف پله و ۳ شیب بررسی کرد و با توجه به تأثیر شکل پله و شیب‌های مختلف سرریز به ارزیابی فاکتورهای اصطکاک و اتلاف انرژی پرداخت و همچنین شکل بهینه پله را تعیین نمود. سامانی و همکاران [۷] با استفاده از مدل آزمایشگاهی اصول حاکم بر هیدرولیک جریان و طراحی سرریزهای پلکانی را مورد بررسی قرار دادند و روابطی را برای محاسبه افت انرژی بدست آوردند. سانچز جانی [۸] با انجام مطالعات آزمایشگاهی میدان فشار را بر روی جریان‌های مستغرق بیان نمودند. بوس و هگر [۹] نیز با تمرکز در مورد هوادهای سطح آزاد و غلظت هوا، سرریزهای پلکانی را به طریق آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و روابطی را جهت طراحی این سرریزها ارائه نمودند. سلماسی [۱۰] با استفاده از مدل‌های فیزیکی و داده‌های آزمایشگاهی هیدرولیک رژیم جریان رویه‌ای روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داد. نادری راد [۱۱] با استفاده از مدل‌سازی عددی استهلاک انرژی را مورد ارزیابی قرار داد. سوری و مجتهدی [۱۲] به بررسی الگوی جریان عبوری روی سرریز پلکانی با استفاده از مطالعه عددی و مدل فیزیکی پرداختند. نتایج نشان داد که در هر دو رژیم جریان تیغه‌ای و رویه‌ای تغییرات حاصل از هندسه‌های متفاوت در افزایش افت انرژی مؤثر است، اما تأثیر این پارامترها در رژیم جریان تیغه‌ای بسیار بیشتر از رژیم جریان رویه‌ای می‌باشد. رازی و همکاران [۱۳] اثرات تعداد پله، شیب و اندازه ذرات بر استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای توری سنگی مورد آزمایش قرار داد و نتیجه گرفت در سرریزهای پله‌ای توری سنگی شیب نمای پایین دست سرریز تأثیر ناچیزی بر افت انرژی جریان دارد. همچنین با بیشتر شدن تعداد پله‌های سازه (برای h/l ثابت) افت انرژی کاهش می‌یابد.

یکی از عواملی که باعث تغییرات اساسی در استهلاک انرژی و پارامترهای هیدرولیکی در سرریز پلکانی می‌شود، تغییرات فرم (شکل) و هندسه سرریز و پلکان‌ها است. هدف این مطالعه بررسی تأثیر افزودن المان‌هایی روی پله‌ها بر تغییرات سرعت و فشار روی



شکل ۱. هندسه و چیدمان گوه‌های مورد بررسی در مطالعه عددی
 Fig. 1. Geometry and alignment of the wedges in the numerical study

جدول ۱. شرایط مرزی مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow-3D
 Table 1. Boundary conditions for numerical modeling in Flow-3D

Direction	Mesh plane		Boundaries	
	min	max	min	Max
X	-0.5	3.5	Volume of rate	Outflow
Y	0	0.5	Wall	Wall
Z	0	0.9	Wall	Symmetry

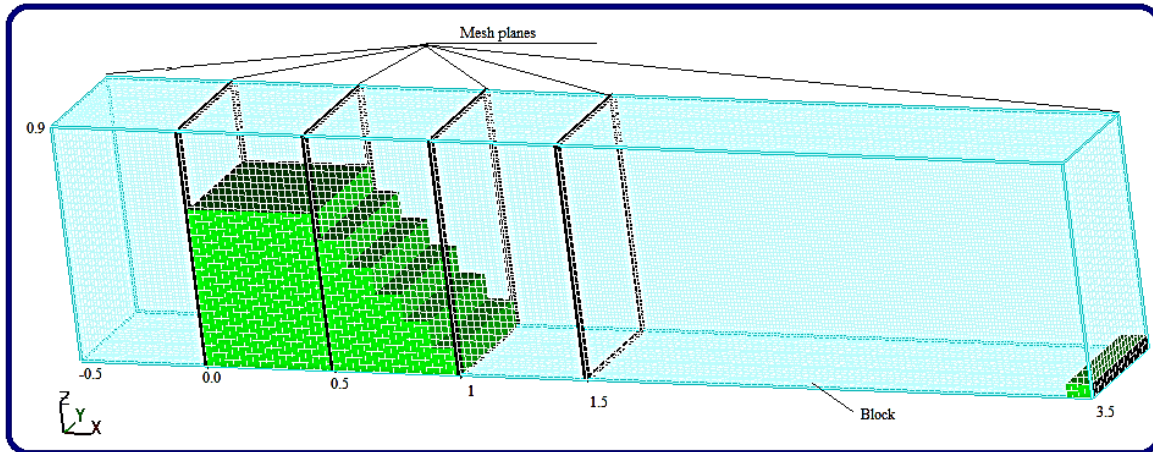
طول فلوم (X)، عرض کانال در جهت (Y) و ارتفاع سرریز در جهت (Z) مدل‌سازی شده است. همچنین برای جلوگیری از تخلیه پایین دست فلوم از بلوک با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. نمایی از مدل عددی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۱- مقایسه مدل‌های آشفتگی (RNG) K-ε و Two-equation(K-ε)

برای حل معادلات آشفتگی و شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در نرم‌افزار Flow-3D، دو مدل آشفتگی (RNG) K-ε و Two-equation(K-ε) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۳ و میانگین خطای نسبی ارائه شده در جدول ۲ می‌توان گفت

f_x شتاب‌های ناشی از لزجت هستند. نرم‌افزار Flow3d کل میدان جریان را بصورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد و از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادلات منفصل می‌شوند.

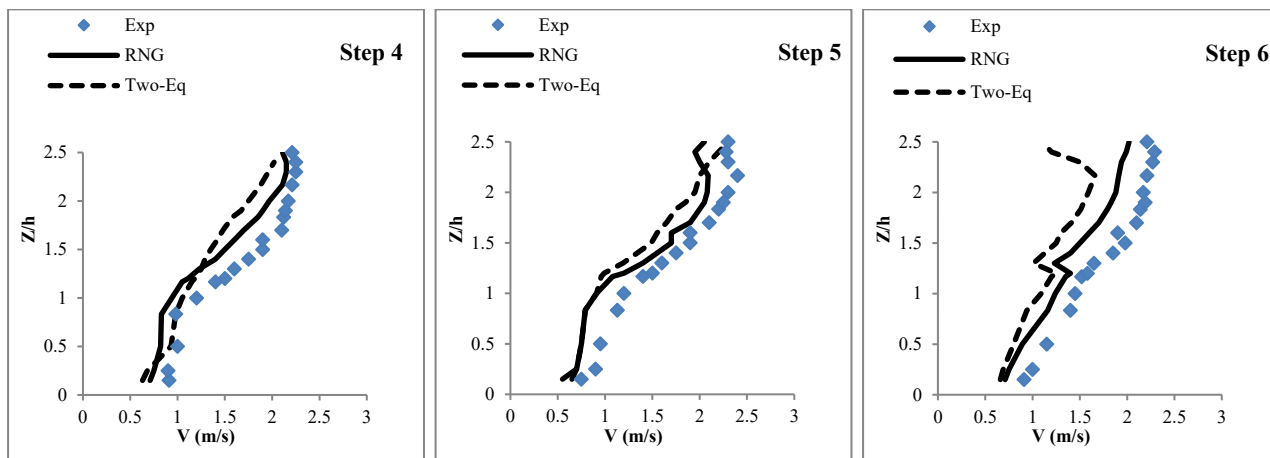
برای ایجاد هندسه‌ی میدان جریان ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Auto Cad-3d فایل‌ی به نام STL تهیه می‌گردد. شبکه‌بندی در دستگاه مختصات کارتزین بوده است. جهت شبکه‌بندی غیریکنواخت، روی تاج سرریز و در پایین دست سرریز از مش ریزتر استفاده شده است. برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد از روش جزء حجم سیال (VOF) برای تعیین سطح مشترک دو سیال (آب و هوا) استفاده شده است. شرایط مرزی به صورت مقادیر جدول ۱ است. جهت جریان در



شکل ۲. مدل عددی در نرم افزار 3D-Flow
Fig. 2. The numerical model in the Flow-3D

جدول ۲. درصد خطای میانگین برای مدل های آشفتگی
Table 2. Percent average error for turbulence models

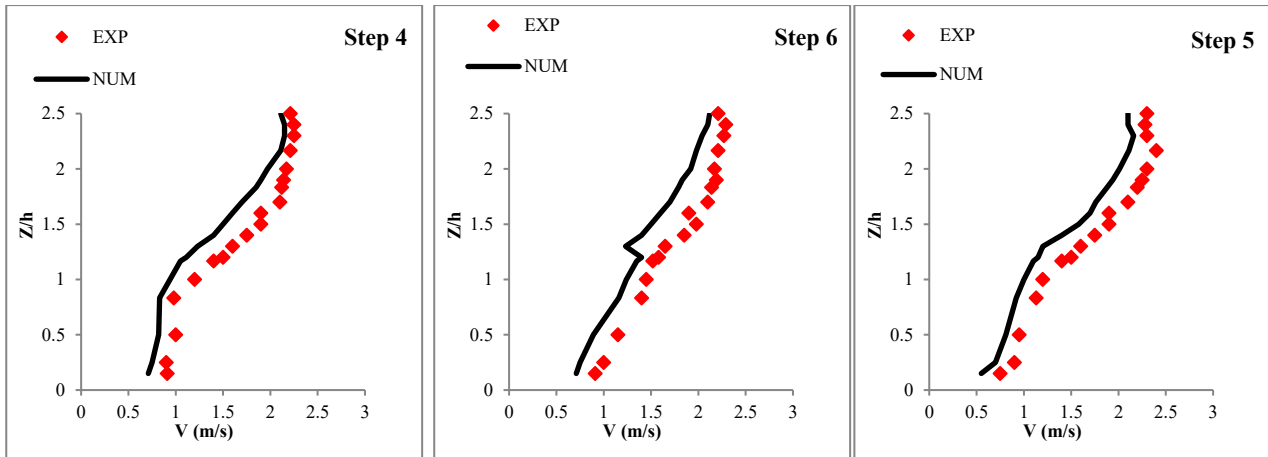
مدل آشفتگی	پله ۴	پله ۵	پله ۶
K-ε (RNG)	۸/۲۳	۹/۳۶	۹/۸۴
Two-equation(K-ε)	۱۳/۷۸	۱۵/۲۸	۱۵/۹۳



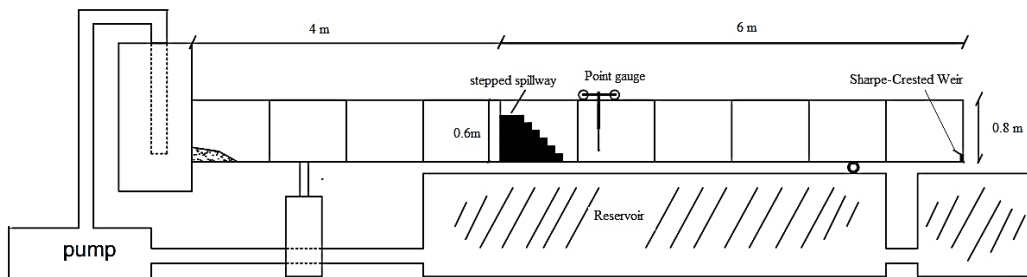
شکل ۳. مقایسه مدل های آشفتگی در نرم افزار 3D-Flow
Fig. 3. Comparison of turbulence models in Flow-3D

نزدیکی لبه پله را نسبت به مدل K-ε (RNG) بهتر شبیه سازی کرده است. دقت مدل Two-equation(K-ε) در نزدیکی سطح جریان، فقط در پله ۵ نسبت به پله های ۴ و ۶ بهتر می باشد. بر اساس نتایج بیان شده می توان گفت در حالت کلی مدل آشفتگی K-ε (RNG) در نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی جریان عبوری بر

که مدل آشفتگی K-ε (RNG) نسبت به مدل آشفتگی Two-equation(K-ε) برای شبیه سازی عددی الگوی جریان بر روی سرریز پلکانی از دقت بالاتری برخوردار است. زمان اتمام شبیه سازی (یکنواخت شدن جریان) در مدل آشفتگی K-ε (RNG) زودتر اتفاق می افتد. مدل آشفتگی Two-equation(K-ε) سرعت جریان در



شکل ۴. توزیع سرعت روی پله‌های ۴، ۵ و ۶
 Fig. 4. Distribution of Velocity on the Steps 4, 5 and 6



شکل ۵. شماتیک کلی از امکانات فلوم آزمایشگاهی
 Fig. 5. General Schematics of laboratory flume facilities

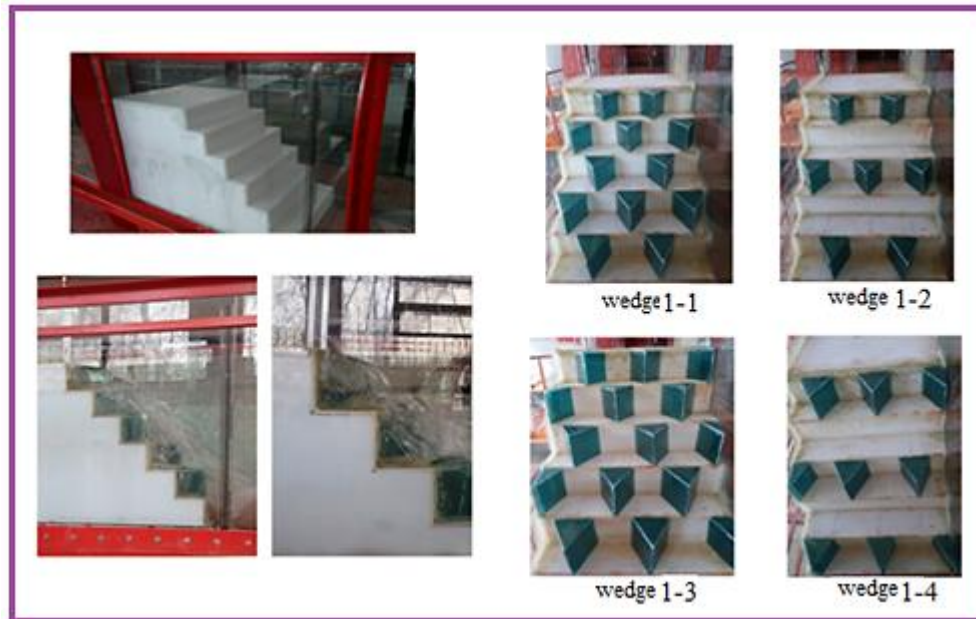
۳- مطالعات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه دانشکده عمران دانشگاه تبریز در کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با سیستم جریان آزاد انجام گردید. جنس دیواره‌های فلوم پلکسی گلاس و کف فلزی (گالوانیزه) بود که جهت تأمین جریان آب از پمپ با قابلیت تغییر دبی استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال از دبی سنج آلتراسونیک نصب شده بر روی لوله مکش پمپ استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری عمق آب از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد که این عمق سنج در طول و عرض کانال متحرک بوده و ارتفاع آب روی سریز و عمق آب در کانال قابل اندازه‌گیری بود (شکل ۵). در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی از سرریز پلکانی ساده به عرض ۵۰ سانتی‌متر (هم‌عرض کانال) و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که دارای ۶ پله با ارتفاع و طول ۱۰

روی سرریز پلکانی از دقت بالاتری برخوردار است.

۲-۲- صحت سنجی مدل عددی

جهت صحت سنجی مدل عددی مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و سرعت در مدل عددی برای دبی ۶۰ لیتر در ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ توزیع سرعت در لبه پله‌های ۴، ۵ و ۶ بر روی سرریز پلکانی را نشان می‌دهد. درصد خطای میانگین نسبی برای پله‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۸/۵۷، ۱۰/۷۲ و ۱۱/۱۸ درصد است. با توجه به شکل ۴ و درصد خطاهای بدست آمده می‌توان گفت بیشترین تطابق در پله ۴ می‌باشد. نمودارهای مربوط به مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیشترین سرعت روی پله‌های ۴ و ۶ در سطح جریان بوده؛ در حالی که برای پله ۵ بیشترین سرعت نزدیک به سطح جریان است.



شکل ۶. هندسه و چیدمان های منتخب المان گوه ای روی سرریز پلکانی در مطالعه آزمایشگاهی
 Fig. 6. Geometry and alignment of the selected wedges in the experimental study

قاعده المان‌ها با طول پله برابر است (شکل ۱). المان گوه ای تیپ ۱ و ۲ با چهار چیدمان برای دبی های ۱۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه مورد مطالعه عددی قرار گرفتند.

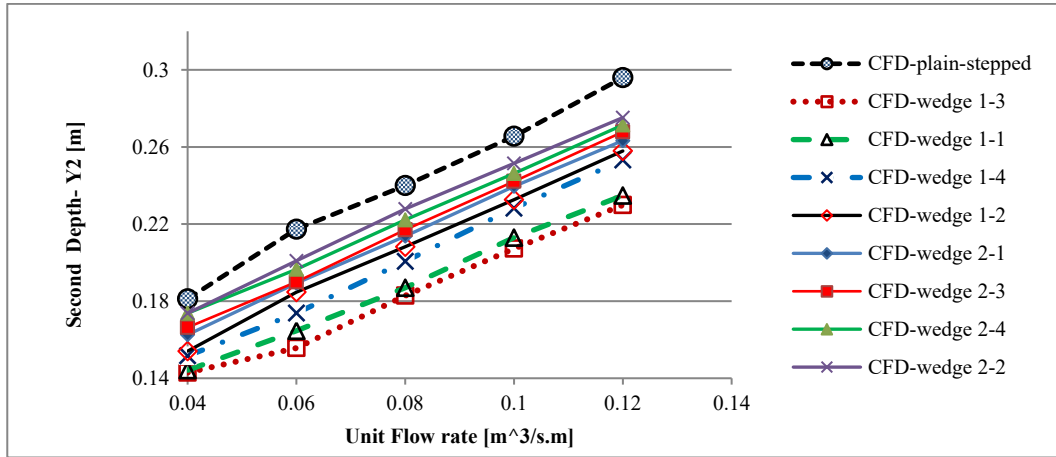
از آنجایی که در آزمایشگاه مقدار V_1 و γ_1 به ترتیب سرعت و عمق جریان در پای سرریز (قبل از پرش هیدرولیکی) به دلیل نوسانات جریان و اغتشاشات فراوان بطور دقیق قابل اندازه گیری نیست، مقدار γ_2 (عمق ثانویه) را اندازه گیری کرده و با استفاده از روابط هیدرولیکی موجود، V_1 و γ_1 و در نهایت استهلاک انرژی قابل محاسبه خواهد بود. بنابراین γ_2 به عنوان پارامتر مناسب در مطالعات عددی و آزمایشگاهی جهت انتخاب هندسه و چیدمان مناسب از گوه‌ها در نظر گرفته شده است. شکل ۷ مربوط به نتایج عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه ای با هندسه و چیدمان های مختلف است. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه ای تیپ ۱ و ۲ دارای عمق ثانویه کمتری نسبت به سرریز پلکانی ساده است. میزان کاهش γ_2 برای سرریزهای پلکانی با المان‌های گوه ای نسبت به سرریز پلکانی ساده در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه ای تیپ ۱ با چهار چیدمان دارای عمق ثانویه کمتری نسبت به سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه ای تیپ ۲ است. المان گوه‌ای (۳-۱)،

سانتی‌متر ($w=h=10\text{cm}$) چهار حالت چیدمان مختلف از المان‌های گوه ای مورد آزمایش قرار گرفت. محدوده تغییرات دبی ۱۰ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه بود. در مجموع ۲۵ آزمایش انجام شد که مدل های آزمایشگاهی در شکل ۶ ارائه شده است. با بررسی معادلات نیمه تجربی موجود برای طول جریان توسعه یافته در کانال، سرریز پلکانی در ۴ متری بالادست نصب گردید. همچنین در بالادست فلوم یک منبع آرام کننده جریان وجود داشت که جهت آرام کردن تلاطم جریان آب از دو صفحه مشبک و در پایین دست آن از سنگریزه و در ادامه از یک صفحه شناور بر روی سطح آب استفاده گردید، بطوری که مشاهده شد جریان پس از ورود به کانال آرام و توسعه یافته است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج و بحث مطالعات عددی

هدف این مطالعه بررسی تأثیر افزودن المان‌های گوه ای شکل روی پله‌ها بر تغییرات سرعت و فشار در کف و لبه پله، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی است. بدین منظور ۲ تیپ از المان گوه ای با چیدمان های مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه قاعده المان گوه ای تیپ یک $0/2$ برابر عرض کانال، المان گوه ای تیپ ۲ با $0/3$ برابر عرض کانال است. برای این دو تیپ المان گوه ای (مثلی در پلان)، ارتفاع وارد بر



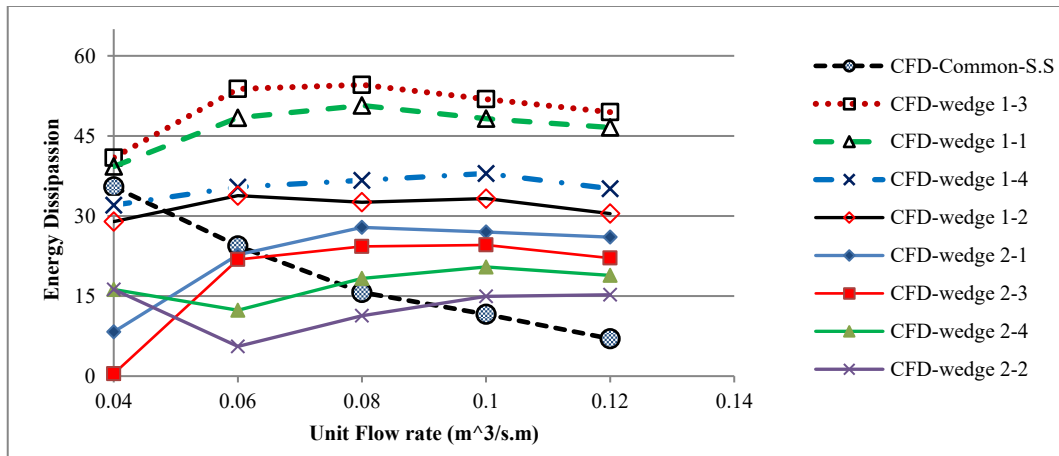
شکل ۷. عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای

Fig. 7. Secondary water depth versus unit flow rate in simple stepped spillway and stepped spillway with wedge elements

جدول ۳. میزان کاهش عمق ثانویه برای سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و ۲

Table 3. secondary depth reduction for stepped spillway with wedge elements of type 1 and 2

سرریز پلکانی با المان گوه‌ای	Wedge 1-1	Wedge 1-2	Wedge 1-3	Wedge 1-4	Wedge 2-1	Wedge 2-2	Wedge 2-3	Wedge 2-4
γ_2 تغییرات (%)	21	13	30	14	10	6	11	7



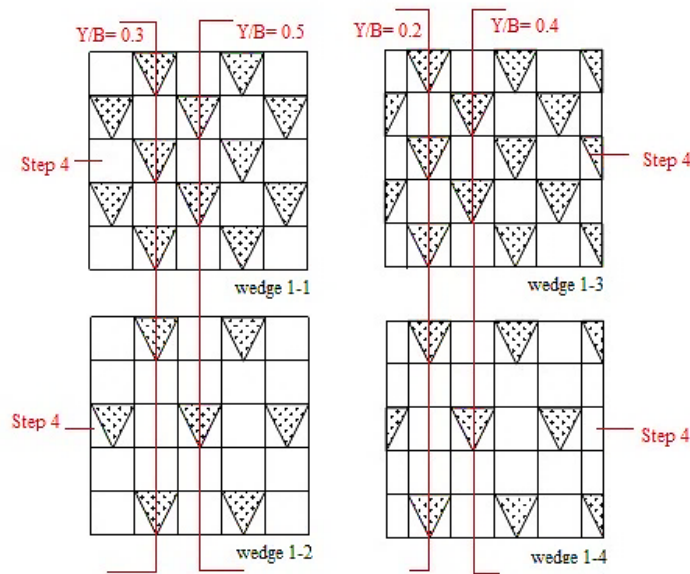
شکل ۸. استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای

Fig. 8. Energy dissipation for simple stepped spillway and stepped spillway with wedge elements

۱ و ۲ نسبت به سرریز پلکانی ساده مقدار انرژی بیشتری مستهلک شده است. بنابراین با توجه به نتایج عددی حاصل از شکل های ۷ و ۸ و جدول ۳ استنباط می شود که سرریز پلکانی تیپ ۱ با چهار چیدمان، دارای کمترین مقدار عمق ثانویه و در نتیجه بیشترین مقدار استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی تیپ ۲

(۱-۱)، (۱-۴) و (۱-۲) به ترتیب باعث کاهش ۳۰٪، ۲۱٪، ۱۴٪ و ۱۳٪ عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی ساده شده است.

شکل ۸ مقادیر استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ و ۲ را نشان می دهد. ملاحظه می شود که در سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ



شکل ۹. پلان مکان بررسی سرعت و فشار روی سرریز پلکانی

Fig. 9. Plans position to check of the velocity and pressure on stepped spillway

و فشار در دیواره قائم با استفاده از ارتفاع پله ($h=10\text{cm}$) و محور افقی در توزیع فشار در کف پله با استفاده از طول پله ($L=10\text{cm}$) بی بعد شده است.

میدان سرعت

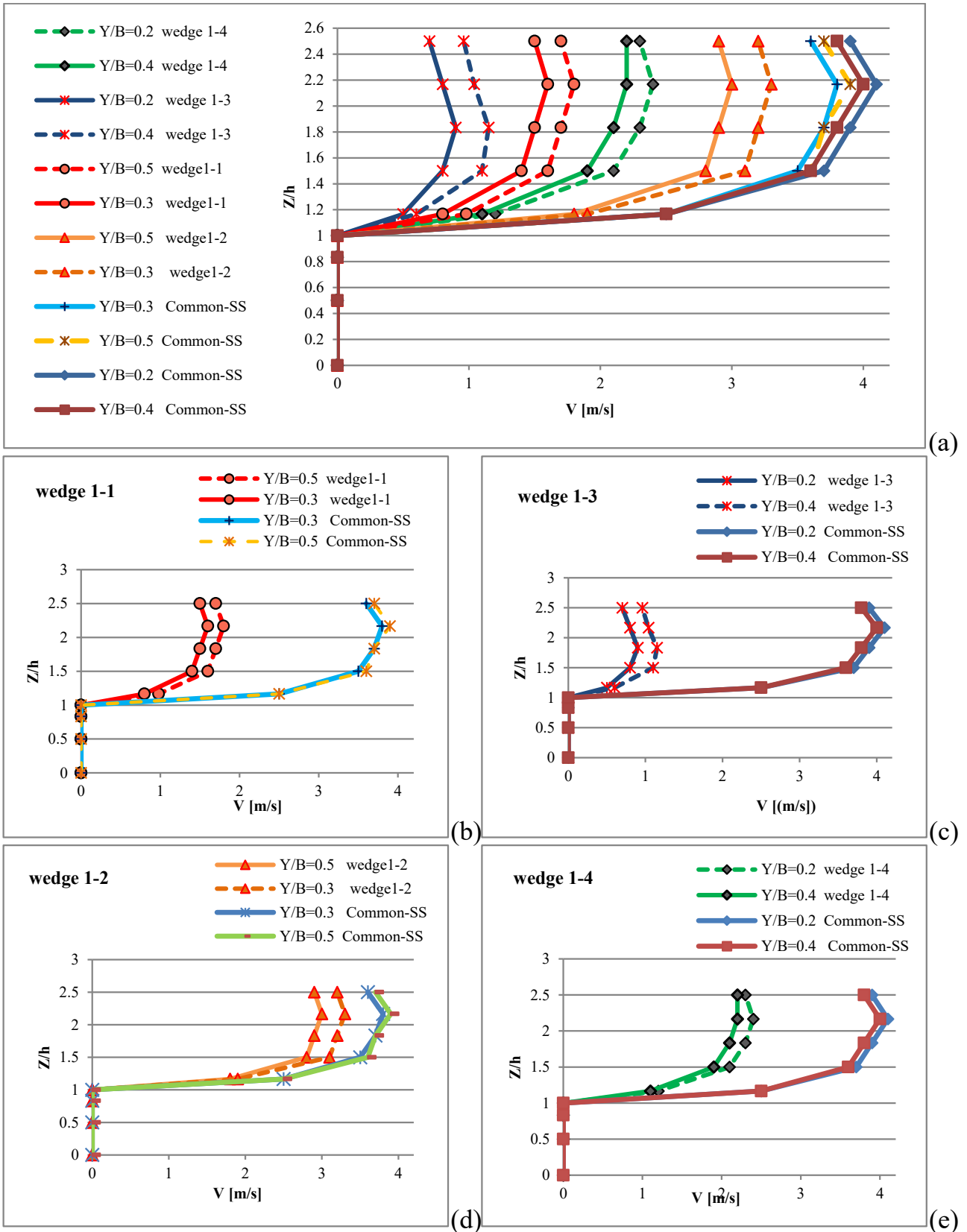
شکل 10a پروفیل توزیع سرعت جریان در دیواره قائم ($x=0$) برای دبی ۶۰ لیتر در ثانیه برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با چهار چیدمان از المان‌های گوه ای تیپ ۱ ترسیم شده است. در دیواره پله از کنج پله ($x=0$) تا ارتفاع یک که معادل لبه پله است، سطح جامد بوده و جریان در جهت افقی حرکتی نداشته است. در نتیجه مقدار سرعت صفر می باشد. پس از گذر از لبه پله در فاصله اندکی از جداره، با ورود جریان به توده منسجم و اصلی پروفیل توزیع سرعت روند افزایش داشته، بطوری که در $0/3$ از سطح آزاد جریان به بیشترین مقدار خود می رسد.

شکل 10b تا 10e پروفیل توزیع سرعت برای هر یک از چیدمان‌های المان‌های گوه‌ای نسبت به سرریز پلکانی ساده رسم شده است. در این نمودارها کاهش چشمگیر سرعت جریان مشهود است. مقدار کاهش سرعت جریان برای مکان‌های مشخص شده در شکل ۷ (مکانی که گوه وجود دارد و مکانی که گوه وجود ندارد) در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۴ ملاحظه می‌شود کاهش سرعت به ترتیب برای چیدمان‌های ۱-۳، ۱-۱، ۱-۴

است. نتایج حاکی از آن است که المان‌های گوه ای با قاعده $0/2$ برابر عرض کانال نتایج بهتری نسبت به المان‌های گوه ای با قاعده $0/3$ برابر عرض کانال دارد. همچنین واضح است که برای المان گوه ای تیپ ۱ چیدمان متراکم تر نتایج بهتری دارد. در واقع به هر اندازه که فاصله گذاری بین المان‌های گوه ای کمتر باشد مقدار عمق ثانویه کمتر و مقدار استهلاک انرژی بیشتر است. بنابراین چیدمان ۳، ۱، ۴ و ۲ از المان‌های گوه ای تیپ ۱ یعنی $(1-3)$ ، $(1-1)$ ، $(1-4)$ و $(1-2)$ به ترتیب دارای بهترین نتایج می باشد و به عنوان مدل های منتخب آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می گیرند.

۱-۱-۴- فشار و سرعت در مدل های عددی

در این بخش تغییرات سرعت و فشار بر روی دیواره قائم و کف پله سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه ای تیپ ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تغییرات سرعت و فشار رو کف پله و دیواره قائم در ناحیه جریان یکنواخت دو مکان در نظر گرفته شده است. مکانی روی پله چهارم که گوه وجود دارد و مکانی که گوه قرار نگرفته است. این پله برای تمامی دبی ها در ناحیه جریان یکنواخت قرار گرفته است. مکان بررسی سرعت و فشار روی پله چهارم در شکل ۹ ترسیم شده است. در این شکل B عرض کانال و برابر $0/5$ متر و Y فاصله از دیواره کانال است. همچنین محور عمودی گراف های سرعت



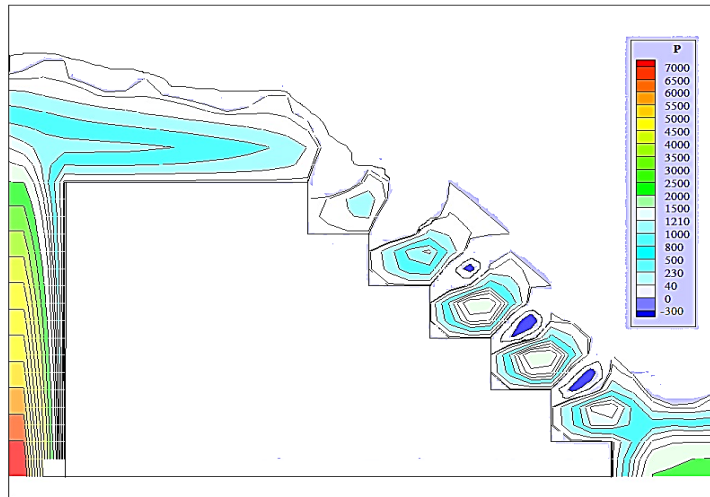
شکل ۱۰. پروفیل قائم توزیع سرعت جریان در دیواره قائم در موقعیت $x=0$ (Z فاصله از کف پله و h ارتفاع پله)

Fig. 10. Vertical profile of the flow velocity distribution in the vertical wall at $x=0$ (Z is the distance from the floor of the step and h is the height of the step)

جدول ۴. میزان کاهش سرعت برای سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای منتخب تیپ ۱

Table 4. Rate of Velocity reduction for stepped spillway with selected wedge elements of type 1

سرریز پلکانی با المان گوه‌ای	Wedge 1-1		Wedge 1-2		Wedge 1-3		Wedge 1-4	
	Y/B=0.3	Y/B=0.5	Y/B=0.3	Y/B=0.5	Y/B=0.2	Y/B=0.4	Y/B=0.2	Y/B=0.4
V تغییرات (%)	61	55	15	23	72	80	47	44



شکل ۱۱. خطوط همتراز فشار استاتیکی (پاسکال) برای سرریز پلکانی ساده با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه

Fig. 11. Contour lines of the static pressure (Pa) for simple stepped spillway with the discharge of 60 liter/s

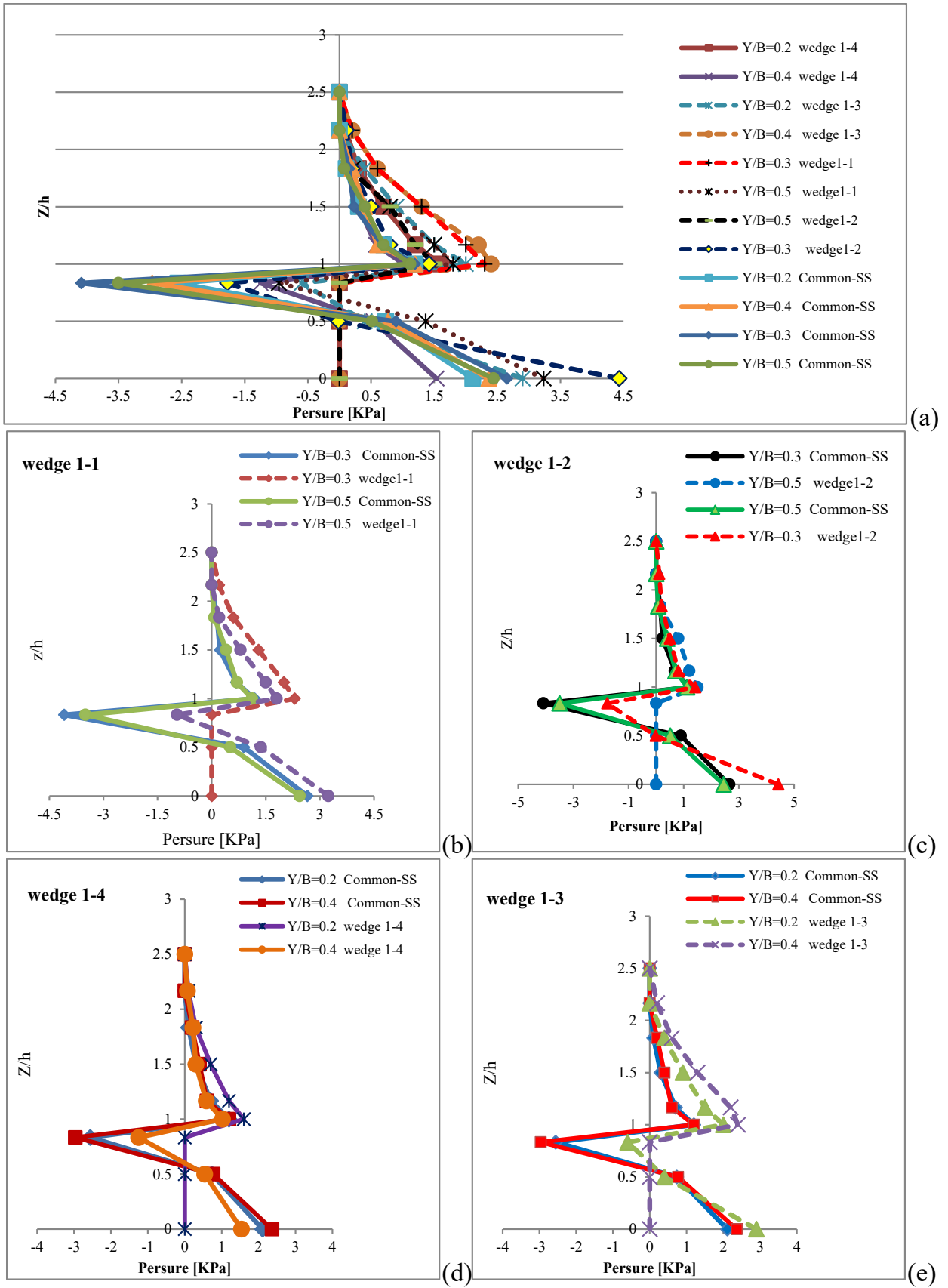
در حدود ۲ تا ۴ مگاپاسکال اعمال می‌کند. برای سرریز پلکانی ساده و گوه‌ای در مکانی که المان وجود ندارد (شکل ۹)، با برخورد جریان به دیواره پله، مقداری از جریان که امکان تغییر جهت آن مهیا نیست، در کنج پله آب راکدی ایجاد می‌کند و باقیمانده جریان با تغییر جهت به سمت بالا و مماس با دیواره حرکت کرده و از این‌رو مقدار فشار کاهش می‌یابد. پس از آن تحت تأثیر جریان آشفته، در عمق ۵/ تا ۰/۸۵ از کنج پله فشار دچار نوسانی می‌شود. بطوری‌که با رسیدن به فاصله قائم ۰/۸۳ از کنج پله تحت تأثیر جدایش جریان قرار گرفته و بیشینه فشار منفی اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از این نقطه و کاهش تأثیر جدایش جریان، همچنین عبور و برخورد جریان جت به لبه پله، فشار به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. پس از گذر از لبه پله و ورود به قسمت منسجم و توده اصلی جریان متناسب با عمق جریان، فشار هیدرولیکی جریان روند کاهشی در پیش گرفته، بطوری‌که در سطح آزاد جریان به مقدار صفر یا فشار اتمسفر می‌رسد. همچنین برای سرریز پلکانی با المان گوه‌ای جایی که المان وجود دارد، از کنج پله تا ارتفاع $z/h=1$ که لبه پله است فشار در دیواره قائم

و ۱-۲ به میزان (۷۲٪-۸۰٪)، (۵۵٪-۶۱٪)، (۴۷٪-۴۴٪) و (۲۳٪-۱۵٪) رخ داده است. در واقع هر قدر تراکم المان‌های گوه‌ای بیشتر باشد، سرعت جریان کاهش بیشتری خواهد داشت. همچنین مکانی که المان گوه‌ای وجود دارد مقدار کاهش سرعت قدری بیشتر است.

میدان فشار

توزیع فشار در قسمت‌های مختلف سرریز پلکانی ساده با استفاده از مدل عددی در شکل ۱۱ آورده شده است. با دقت در شکل ۹ مشاهده می‌شود که به واسطه افزایش سرعت جریان در نواحی نزدیک به لبه قائم پله، فشار جریان در این نواحی از فشار اتمسفر پایین‌تر می‌باشد. بنابراین در صورت قراردادن المان‌هایی در این ناحیه سرعت جریان کاهش یافته و موجب افزایش فشار و پیشگیری از ایجاد کاویتاسیون شده که در نهایت موجب کاهش سرعت در پای سرریز و افزایش استهلاک انرژی می‌گردد.

نمودارهای شکل ۱۲a مربوط به تغییرات فشار در مقطع قائم پله است. حرکت جریان آب در لبه پله به سمت دیواره پله بوده و فشاری



شکل ۱۲. پروفیل قائم توزیع فشار در دیواره قائم در موقعیت $0=x$ (Z فاصله از کف پله و h ارتفاع پله)

Fig. 12. Vertical profile of the Pressure distribution in the vertical wall at $x=0$ (Z is the distance from the floor of the step and h is the height of the step)

جدول ۵. میزان افزایش فشار مثبت و کاهش فشار منفی برای سرریز پلکانی با المان‌های گوه‌ای منتخب تیپ ۱

Table 5. Positive pressure increase and negative pressure reduction for stepped spillway with selected wedge elements of type 1

سرریز پلکانی با المان گوه‌ای	Wedge 1-1		Wedge 1-2		Wedge 1-3		Wedge 1-4	
	z/h=1	z/h=0.83	z/h=1	z/h=0.83	z/h=1	z/h=0.83	z/h=1	z/h=0.83
P تغییرات (%)	93+	72-	+34	-56	+200	-96	+37	-59

* علامت مثبت یعنی افزایش فشار مثبت، و علامت منفی یعنی کاهش فشار منفی

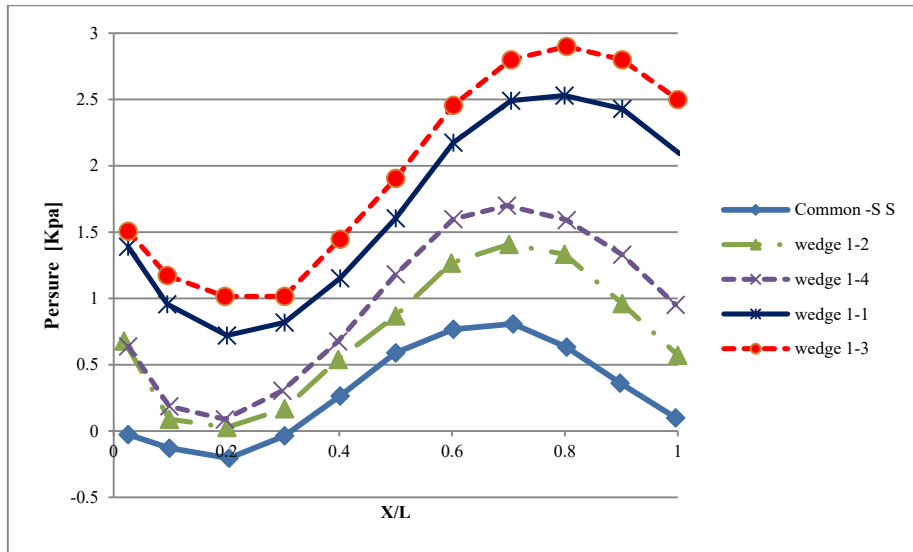
Wedge 1-4 و Wedge 1-2 المان‌های گوه‌ای روی پله‌ها به صورت یک درمیان قرار دارد. روند کاهش فشار منفی و افزایش فشار مثبت، زمانی که المان‌های گوه‌ای متراکم تر است، چشمگیرتر است. بنابراین تأثیر افزودن المان‌های گوه‌ای بر کاهش فشار منفی و کاهش خطر وقوع کاویتاسیون به ترتیب برای سرریز با المان گوه‌ای با چیدمان ۱-۱، ۱-۲، ۱-۳ و ۱-۴ بهترین نتیجه را به همراه داشته است. شکل ۱۳ مربوط به تغییرات فشار در کف پله سرریز پلکانی ساده و سرریز همراه با المان‌های گوه‌ای با چیدمان‌های متفاوت در ناحیه توسعه یافته جریان (یکنواخت) با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه می باشد. نمودارهای فشار برای سرریزهای پلکانی از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس کاهش پیدا می کند. پس از آن تا یک مقدار بیشینه افزایش پیدا کرده و با نزدیک شده به لبه پله به علت جدایش جت، مقدار فشار دوباره حالت نزولی پیدا می کند. مقدار فشار بیشینه برای سرریز پلکانی ساده و سرریز گوه‌ای ۱-۲ و ۱-۴ در ۰/۷ طول کف پله و برای سرریز گوه‌ای ۱-۱ و ۱-۳ در ۰/۸ طول کف پله رخ می دهد و مقدار کمینه در $x/l=0.2$ اتفاق می افتد. با افزودن المان‌های گوه‌ای فشار منفی در نزدیکی کنج پله به فشار مثبت تبدیل شده که خطر وقوع کاویتاسیون را از بین برده و فشار بیشینه در نزدیکی لبه پله افزایش می یابد. افزایش فشار کمینه و بیشینه به ترتیب برای چیدمان ۱-۳، ۱-۱، ۱-۲ و ۱-۴ رخ داده است. در واقع با تراکم بیشتر المان‌های گوه‌ای و قرارگیری آنها روی همه پله‌ها نتایج بهتری بدست آمده است.

۴-۲- مطالعه آزمایشگاهی

چهار مدل منتخب از المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ که دارای بهترین نتایج عددی است مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. در این تحقیق، با اندازه گیری دبی و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ($\gamma/2$)، ابتدا

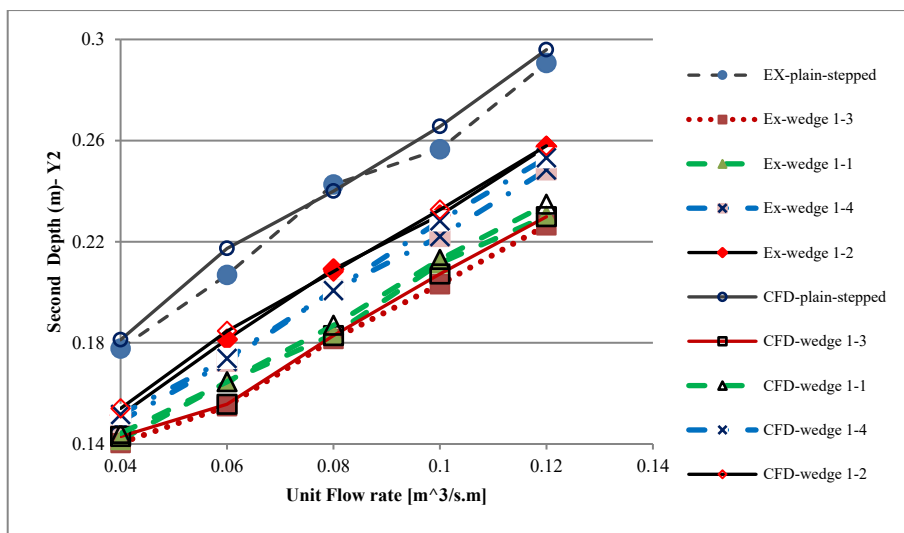
برابر صفر و با جدا شدن از لبه پله فشار افزایش می‌یابد و متناسب با عمق جریان فشار هیدرولیکی کاهش یافته و در سطح آزاد جریان برابر صفر می‌شود.

با توجه به نمودارهای ۱۲b تا ۱۲e فشار در دیواره قائم برای سرریز پلکانی ساده در $z/h=0.83$ بیشترین مقدار منفی را داراست که با قرار دادن المان‌های گوه‌ای مقدار فشار منفی بسیار کاهش می‌یابد. با رسیدن جریان به لبه پله ($z/h=1$) فشار مثبت شده و با افزودن المان گوه‌ای روی سرریز پلکانی فشار مثبت در کنج پله نیز افزایش می‌یابد. میزان کاهش فشار منفی در دیواره قائم پله و افزایش فشار مثبت در لبه پله برای سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که با افزودن المان گوه‌ای تیپ ۱ با چیدمان‌های wedge1-1، wedge1-2، wedge1-3، wedge1-4 مقدار فشار منفی در دیواره قائم پله به ترتیب به میزان ۰/۷۲٪، ۰/۵۶٪، ۰/۹۶٪ و ۰/۵۹٪ کاهش یافته است (بطور مثال برای wedge1-1 مقدار آن از 3.5 MPa به -0.96 MPa رسیده است). همچنین فشار مثبت در لبه پله برای wedge1-1، wedge1-2، wedge1-3 و wedge1-4 به ترتیب ۰/۹۳٪، ۰/۳۴٪، ۰/۲۰٪ و ۰/۳۷٪ افزایش یافته است (بطور مثال برای wedge1-1 مقدار آن از 1.19 MPa به 2.3 MPa رسیده). تغییرات فشار مثبت و فشار منفی برای سرریز پلکانی با المان گوه‌ای Wedge 1-1 و Wedge 1-3 مشابه و برای Wedge 1-2 و Wedge 1-4 نیز مشابه می‌باشد. بطوری که در Wedge 1-1 و Wedge 1-3 درصد افزایش فشار مثبت بیش از درصد کاهش فشار منفی است و در Wedge 1-2 و Wedge 1-4 درصد افزایش فشار مثبت کمتر از درصد کاهش فشار منفی است که دلیل اصلی آن حالت چیدمان المان‌های گوه‌ای است. در حالت Wedge 1-1 و Wedge 1-3 المان گوه‌ای روی همه پله‌ها قرار دارد در حالی که در



شکل ۱۳. پروفیل افقی توزیع فشار در کف پله (X فاصله از کنج پله و L طول پله)

Fig. 13. Horizontal profile of the pressure distribution in the floor of the step (X distance from the step corner and L length)



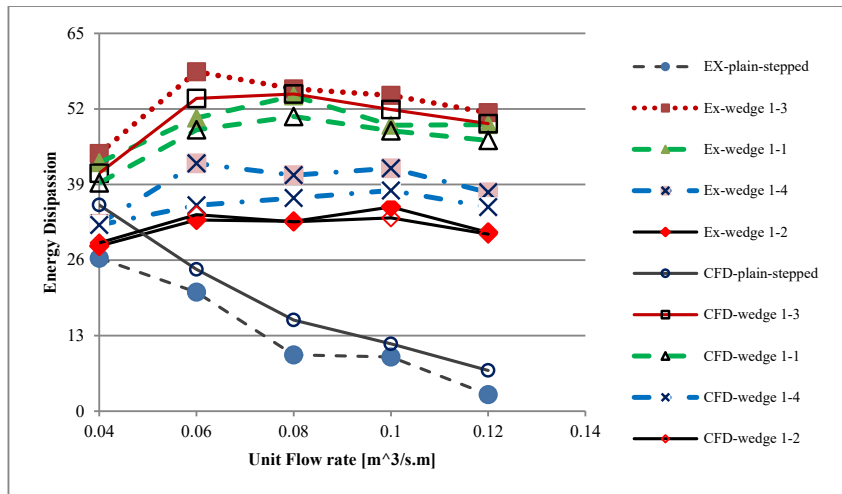
شکل ۱۴. عمق ثانویه عددی و آزمایشگاهی سرریز پلکانی ساده و سرریز با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱

Fig. 14. Numerical and laboratory secondary water depth of a simple stepped spillway and stepped spillway with a wedge element type 1

قابل مشاهده است. درصد خطای مقدار عمق ثانویه جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی بسیار اندک بوده، بطوری‌که برای سرریز پلکانی ساده $3/46\%$ ، سرریز با $wedge 1-1$ $3/28\%$ ، سرریز با $wedge 1-2$ $3/02\%$ ، سرریز با $wedge 1-3$ $3/29\%$ و برای سرریز با $wedge 1-4$ $3/41\%$ می‌باشد که نشان از تطابق مناسبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی است و این میزان پراکندگی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی قابل صرف‌نظر است. برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود که با افزایش دبی واحد مقدار عمق ثانویه هم

عمق بحرانی (y_c) محاسبه شد سپس با استفاده از روابط هیدرولیکی عمق اولیه پرش هیدرولیکی (y_1) و مقدار سرعت در پای سرریز (V_1) محاسبه گردید.

شکل ۱۴ داده‌های مربوط به عمق ثانویه آب در مقابل دبی واحد برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی همراه با المان‌های گوه‌ای تیپ ۱ را نشان می‌دهد. در این شکل ملاحظه می‌شود که داده‌های مربوط به سرریز با المان‌های گوه‌ای با هم تفاوت چندانی ندارند، ولی تفاوت بین آنها و سرریز ساده برای مطالعه عددی و آزمایشگاهی



شکل ۱۵. تغییرات استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه ای تیپ ۱

Fig. 15. Changes of the energy dissipation for simple stepped spillway and stepped spillway with wedge elements of type 1

افزایش یافته است. در واقع مدل با چیدمان متراکم تر از المان‌های گوه ای، انرژی را بیشتر از حالت ساده مستهلک می کند. همچنین مدلی که دارای نصف المان گوه ای در دیواره کانال (مدل ۱-۳ و ۱-۴) است نسبت به مدلی که فاقد نصف گوه ها است (مدل ۱-۱ و ۱-۲)، مقدار انرژی را بیشتر مستهلک می کند.

۵- نتیجه گیری کلی

هدف این مطالعه بررسی تأثیر افزودن المان‌های گوه ای شکل روی سرریز پلکانی بر تغییرات سرعت و فشار روی کف و لبه پله، تغییرات سطح آب پایین دست سرریز و در نتیجه استهلاک انرژی است. بدین منظور ابتدا ۲ تیپ از المان گوه ای با چیدمان‌های مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین هندسه و چیدمان مورد آزمایش قرار گرفت. المان گوه ای تیپ ۱ با قاعده ۰/۲ برابر عرض کانال، المان گوه ای تیپ ۲ با قاعده ۰/۳ برابر عرض کانال است. مطالعات عددی این مدل‌ها نشان داد که سرریز پلکانی با المان‌های گوه ای تیپ ۱ با ۴ چیدمان متفاوت دارای کمترین عمق ثانویه و در نتیجه بیشترین استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده و سرریزهای پلکانی با المان‌های گوه ای تیپ ۲ است. همچنین با تراکم المان‌های گوه ای نتایج بهتری بدست می آید. در واقع با کاهش فاصله بین المان‌ها استهلاک انرژی افزایش و عمق ثانویه کاهش می یابد، بطوری که المان گوه ای در سرریز پلکانی با wedge1-1, wedge1-3, wedge1-4 و wedge1-2 به ترتیب

افزایش می یابد. همچنین مدل با چیدمان متراکم تر از المان‌های گوه ای، عمق ثانویه کمتری دارد. در واقع برای یک دبی مشخص با المان گذاری متراکم تر مقدار عمق ثانویه کاهش یافته است. با المان گذاری متراکم تر سرعت جریان در پای سرریز کاهش یافته (عدد فرود کاهش می یابد) و عمق قبل از پرش هیدرولیکی افزایش می یابد. با توجه به اینکه عمق قبل از پرش هیدرولیکی افزایش یافته و عدد فرود هم کاهش یافته است، جریان آب با انرژی کمتری پرش داشته و طبق روابط هیدرولیکی عمق ثانویه نیز کاهش می یابد.

شکل ۱۵ تغییرات استهلاک انرژی را برای سرریز پلکانی ساده و سرریز پلکانی با المان‌های گوه ای تیپ ۱ نشان می دهد. در این شکل دیده می شود که با افزایش دبی استهلاک انرژی برای سرریز با المان‌های گوه ای افزایش و سپس با شیب اندک کاهش می یابد، در حالی که با افزایش دبی مقدار استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده به صورت کاهشی است. همچنین مقدار استهلاک انرژی برای سرریز با المان‌های گوه ای نسبت به حالت ساده افزایش یافته است، بطوری که استهلاک انرژی برای Wedge 1-1 به میزان ۲/۴ برابر، برای Wedge 1-2 به اندازه ۱/۲۴ برابر، Wedge 1-3 به میزان ۲/۷ برابر و برای Wedge 1-4 به میزان ۱/۶۲ برابر نسبت به سرریز پلکانی ساده افزایش یافته است. در واقع با افزودن المان‌های گوه ای زبری پله ها افزایش یافته و مقدار بیشتری از انرژی را مستهلک کرده است. همچنین برای داده های آزمایشگاهی و عددی ملاحظه می شود که برای یک دبی مشخص با المان گذاری بیشتر مقدار استهلاک انرژی

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از مدل های عددی و آزمایشگاهی چنین استنباط می شود که برای کاهش سرعت، کاهش فشار منفی و افزایش فشار مثبت روی پله و نیز برای افزایش استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی می توان از المان های گوه ای استفاده کرد. در واقع با افزودن المان های گوه ای زبری پله ها افزایش یافته و مقدار بیشتری از انرژی را مستهلک کرده است. المان های گوه ای با قاعده $0/2$ برابر عرض کانال نتیجه مناسب تری خواهد داشت و چیدمان متراکم تر این المان ها نتایج را دوچندان خواهد نمود.

مراجع

- [1] N. RAJARATNAM. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116.1990, 587-591.
- [2] H. CHANSON. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of hydraulic research*, 32.1994, 213-218.
- [3] M. R. CHAMANI & N. RAJARATNAM. Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120.1994, 254-259.
- [4] J.A. KELLS. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes discussion. *IAHR Journal of Hydraulic Research* 33.1995, 128-133.
- [5] M. TABBARA, J. CHATILA & R. AWWAD. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & structures*, 83.2005, 2215-2224 .
- [6] M. AZHDARY MOGHADDAM 1997. *The hydraulics of flow on stepped ogee-profile spillways*, University of Ottawa (Canada).
- [7] A. KABIRI-SAMANI & M. R. NAZARZADEH. Evaluation of the principles governing on hydraulic flow and design of the stepped spillway. *Journal of Technical School*, 38.2004, 339-347(in Persian).
- [8] M. S' NCHEZ-JUNY, E. BLADE & J. DOLZ. Pressures on a stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 45.2007, 505-511.
- [9] R. M. BOES & W. H. HAGER. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129.2003, 661-670.

باعث کاهش 30% ، 21% ، 14% و 13% عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی ساده شده است.

المان گوه ای در سرریز پلکانی با چیدمان wedge1-3، wedge1-1، wedge1-4 و wedge1-2 به ترتیب باعث کاهش 30% ، 21% ، 14% و 13% عمق ثانویه نسبت به سرریز پلکانی ساده شده است. پروفیل های توزیع سرعت نشان داد که با افزودن المان های گوه ای تیپ ۱ با چیدمان wedge1-1، wedge1-3، wedge1-4 و wedge1 به ترتیب به میزان $(72\% - 80\%)$ ، $(61\% - 55\%)$ ، $(44\% - 47\%)$ و $(23\% - 15\%)$ کاهش سرعت در مقطع قائم پله رخ داده است. با افزودن المان گوه ای تیپ ۱ با چیدمان های wedge1-1، wedge1-3، wedge1-4 و wedge1-2 مقدار فشار منفی در دیواره قائم پله به ترتیب به میزان 72% ، 59% و 56% کاهش یافته است. فشار مثبت در لبه پله برای همان چیدمان به ترتیب 20% ، 93% ، 37% و 34% افزایش یافته است. تغییرات فشار مثبت و فشار منفی برای سرریز پلکانی با المان گوه ای Wedge 1-1 و Wedge 1-3 مشابه و برای Wedge 1-2 و Wedge 1-4 نیز مشابه می باشد. بطوری که در Wedge 1-1 و Wedge 1-3 درصد افزایش فشار مثبت بیش از درصد کاهش فشار منفی است و در Wedge 1-2 و Wedge 1-4 درصد کاهش فشار منفی بیش از درصد افزایش فشار مثبت است که دلیل اصلی آن حالت چیدمان المان های گوه ای است. در حالت Wedge 1-1 و Wedge 1-3 المان گوه ای روی همه پله ها قرار دارد؛ در حالی که در Wedge 1-2 و Wedge 1-4 المان های گوه ای روی پله ها به صورت یک درمیان قرار دارد. روند کاهش فشار منفی و افزایش فشار مثبت، زمانی که المان های گوه ای متراکم تر است، چشمگیرتر است.

همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی استهلاک انرژی برای سرریز با المان های گوه ای افزایش و سپس با شیب اندک کاهش می یابد، در حالی که با افزایش دبی مقدار استهلاک انرژی برای سرریز پلکانی ساده به صورت کاهشی است. همچنین مقدار استهلاک انرژی برای سرریز با المان های گوه ای نسبت به حالت ساده افزایش یافته است. بطوری که استهلاک انرژی برای Wedge 1-1 به میزان $2/4$ برابر، برای Wedge 1-2 به اندازه $1/24$ برابر، برای Wedge 1-3 به میزان $2/7$ برابر و برای Wedge 1-4 به میزان $1/62$ برابر نسبت به سرریز پلکانی ساده افزایش یافته است.

- [12] N. SOURI & A. MOJTAHEDI. 2014. *Investigation of the flow pattern on stepped spillway using numerical study and physical model*. Tabriz University (in Persian).
- [13] S. RAZI, F. SALMASI & A. H. DALIR. Laboratory Study of the Effects of Step Number, Slope and Particle Size on Energy Dissipation in Gabion Stepped Spillways. *Amir Kabir Civil Engineering Journal*, 2018.
- [10] F. SALMASI. Hydraulic of nappe Flow regime over stepped spillway. *Journal of Shahid Chamran University of Ahvaz*, 2004, 32-56 (in Persian).
- [11] I. N. RAD & M. TEIMOURI. An investigation of flow energy dissipation in simple stepped spillways by numerical model. *European Journal of Scientific Research*, 47.2010

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Roushangar, S. Akhgar, *Numerical and Experimental Study of Wedge Elements Influence on Hydraulic Parameters and Energy Dissipation over Stepped Spillway in Skimming Flow Regime*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 185-200.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14587.5689](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14587.5689)

